

III-568

クリッキングと拡張カルマンフィルタを用いた透水係数の空間分布推定法

清水建設(株) 大崎研究室 正会員 ○ 奥野 哲夫
同上 正会員 鈴木 誠
同上 正会員 本多 眞

1. はじめに

一般に地盤の透水性に関する逆解析(同定)では、限られた地下水位観測データや透水係数の測定値を有効に利用することが望まれる。そこで今回は、拡張カルマンフィルタによる同定手法¹⁾を用いて、揚水試験における地下水位観測データのほかに一部領域の透水係数が測定されている場合を対象として、これらのデータを有効に利用する方法をシミュレーションにより検討した。

2. 解析ケースと解析方法

地下水位観測データと透水係数の測定値を用いた拡張カルマンフィルタの定式化は文献1)を参照されたい。ここでは空間分布推定に用いるデータの有効性を比較するため、表-1に示す3ケースを設定した。すなわち、地下水位観測データのみ用いるCASE-Aと、

地下水位観測データと透水係数の測定値を用いるCASE-B、CASE-Cを設定した。さらに、CASE-Cでは透水係数の測定値から事前のデータ処理としてクリッキング²⁾により空間分布推定を行い、その結果を拡張カルマンフィルタの初期値とした。以上の3ケースの解析を行うにあたり、平面2次元領域の有限要素モデルを図-1のように設定した。透水係数の確率分布は対数正規分布とし、平均値と共分散関数を表-2のように設定した。この特性を有する母集団から透水係数の空間分布モデルを1つ作成したが、その作成方法は文献1)と同様である。ここで作成した透水係数の空間分布モデルは図-2に示すものであり、初めに要素中心位置の透水係数を発生させ、その値を用いて要素内一定の透水係数値とした。なお、全領域で有効間隙率(比貯留係数)は確定値6%の既知量とした。図-2は設定した要素の透水係数を図-1の要素中心位置に割り当てて描いたコンター図で、図-1の破線の領域を示している。このモデルを用いて図-1に示す領域中央で $2.0 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{s}$ (1200l/min)の揚水を行った場合を想定して、全領域一律0m(地表面)の初期水位から非定常の不圧地下水解析を行い、図-1の13点で地下水位の経時変化を算定した。この値を模擬の地下水位観測データとして、先の3ケースにより設定した透水係数(図-2)の空間分布推定を行った。なお、CASE-B、CASE-Cでは図-1の4要素の透水係数も測定されているものとし、さらにCASE-Cではこの測定値を用いて各要素中心位置で透水係数の推定値と推定誤差共分散マトリックスをクリッキングにより推定し、その結

表-1 解析ケースと解析条件

解析ケース	観測・測定値 (図-1参照)	拡張カルマンフィルタの透水係数初期値	
		推定値	推定誤差共分散
CASE-A	地下水位; 13点	母集団の平均値	母集団の共分散
CASE-B	地下水位; 13点 透水係数; 4要素	母集団の平均値および 測定された透水係数	母集団の共分散
CASE-C	地下水位; 13点 透水係数; 4要素	クリッキングにより 求めた推定値	クリッキングにより 求めた推定誤差共分散

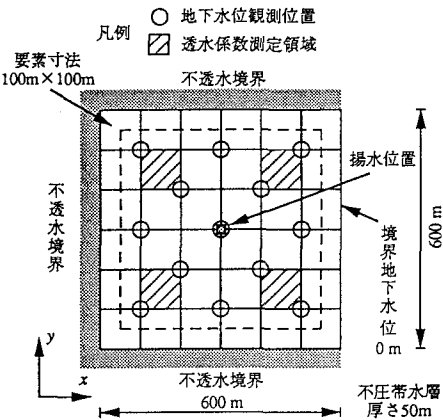


図-1 解析モデル図

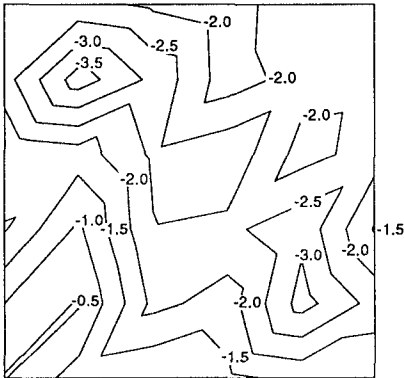


図-2 設定した透水係数分布モデル
(透水係数(単位cm/s)の常用対数値)

表-2 設定した透水係数の母集団 (対数正規分布)

平均値	共分散関数
透水係数(単位cm/s)の 常用対数をとった値 -2 ($1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$)	$C(h) = \sigma^2 \cdot \exp \left[- \left\{ \left(\frac{h_x}{a_x} \right)^2 + \left(\frac{h_y}{a_y} \right)^2 \right\}^{1/2} \right]$ $\sigma^2 = 1.0, a_x = a_y = 200\text{m}, h = (h_x^2 + h_y^2)^{1/2}$

果を拡張カルマンフィルタの初期値とした。また、拡張カルマンフィルタにおいて地下水位の推定誤差共分散マトリクスは分散のみ考慮して $1.0 \times 10^{-2}m$ とし、地下水位観測誤差の共分散マトリクスも分散のみ考慮して $1.0 \times 10^{-4}m$ とした。さらに、状態方程式において誤差はないものとした。

3. 解析結果と考察

図-3～5に拡張カルマンフィルタによる推定結果を示す。CASE-BとCASE-Cは透水係数の測定値も観測値として用いていることから、CASE-Aよりも設定した透水係数の空間分布（図-2）に近い結果が得られている。さらに推定精度を比較するため、推定の過程で求まる残差 E を次式で算出し図-6に示す。

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{K}_i - K_i)^2}{n}}$$

n : 要素数
 $\bar{K}_i$: 透水係数の推定値
 K_i : 透水係数の真値

図-6から、繰り返し計算が進む過程で、各ケースの残差 E が変化する様子が見える。計算した範囲では、最終的にCASE-C、CASE-B、CASE-Aの順で残差 E が小さくなる。このような順番で残差 E が小さくなる理由は、CASE-BとCASE-Cは透水係数の測定値を用い、さらにCASE-Cでは初期値としてクリッキングによる空間分布推定値と推定誤差共分散マトリクスを評価した効果が現われているものと考えられる。ただし、このような有効性は確率特性にも依存すると考えられる。

4. おわりに

今回の検討では、揚水試験における地下水位観測データの他に、一部領域の透水係数が測定されている場合を対象として、これらのデータを有効に利用する方法をシミュレーションにより検討した。その結果、透水係数の空間分布特性（確率特性）が既知で、その測定値がいくつか得られている場合は、クリッキングによる空間分布推定を事前に実施し、それから求まる推定値と推定誤差共分散マトリクスを拡張カルマンフィルタによる同定手法の初期値にすることで比較的精度のよい推定が行えることが確認できた。

参考文献

- 1) 奥野哲夫, 鈴木誠, 不圧浸透問題における拡張カルマンフィルタを用いた空間的透水係数分布の推定, 第27回土質工学研究発表会, 1992. (投稿中)
- 2) Marsily, G. de, Quantitative Hydrogeology, Academic Press Inc., 1986.

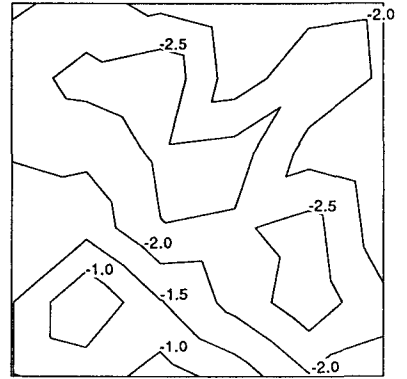


図-3 透水係数の推定値 (CASE-A)
(透水係数 (単位cm/s) の常用対数値)

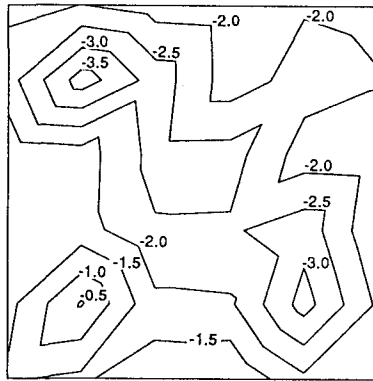


図-4 透水係数の推定値 (CASE-B)
(透水係数 (単位cm/s) の常用対数値)

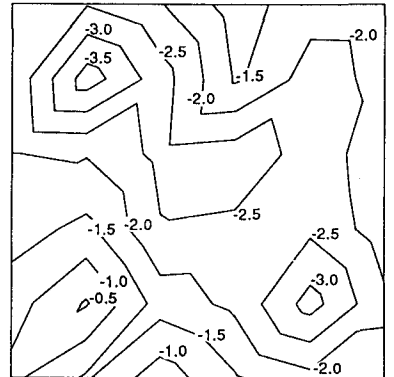


図-5 透水係数の推定値 (CASE-C)
(透水係数 (単位cm/s) の常用対数値)

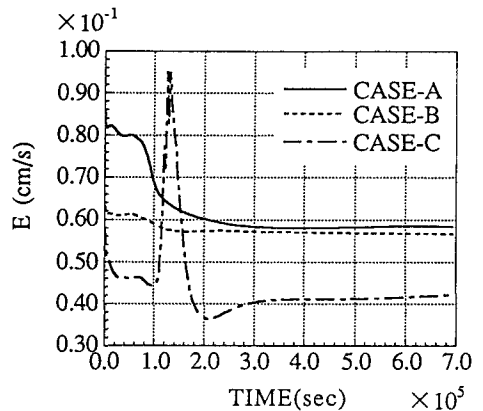


図-6 繰り返し計算時の残差 E の経時変化